

대체 난방용 히트파이프 온도 제어 시스템 설계에 관한 연구

윤석암*, 서장수**, 조경재***, 차인수****

- * 송원대학 전자미디어과
- ** 송원대학 디지털 전기정보과
- *** 담양대학 인터넷정보통신과
- **** 동신대학교 전기광전자공학부

A Study on the Temperature Control System Design of Heat Pipe for Alternative Heating

S.A. Yoon*, J.S. Shu**, K.J. Cho***, and I.S. Cha****

- * Dept. of Electric Media Eng. Songwon College
- ** Dept. of Digital Electrical Information Songwon College
- *** Dept. of Internet Information & Communication Eng. Provincial College of Damyang
- **** Dept. of Electrical and Optic Electronic Eng. Dongshin Univ.

ABSTRACT

The waste heat recovery system using heat pipe was tested for the consideration of developing the high-efficiency waste heat recovery technology.

Heat pipe, a effective device that can quickly transfer large amounts of heat energy using the phase change of the working fluid and the characteristics of Electric Heater Bars used for alternative heating system are introduced in this paper. In order to increase energy efficiency, the system which controls the status of electric heater bars and the temperature of heat pipe installed has developed.

1. 서 론

산업이 점차 발달함에 따라 소비자의 요구사항은 소형화, 고출력, 고집적화, 저가격화, 에너지 절약 기술 개발 및 보급이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 또한 이러한 제품의 특성상, 제품으로부터 발생하는 다량의 열을 효과적으로 제어하는 기술은 종래에 생각하였던 것보다 훨씬 더 중요하게 인식되고 있다.

이미 실용화되고 있는 제품 혹은 시스템에서 발생하는 열을 효과적으로 외부로 방출하거나 쓸모가 없이 여겨졌던 폐열을 재활용하는 것이야말로 국가 시책으로 추진중인 대체에너지 차원에서 효과적

인 결과를 얻을 수 있다.

난방용 시스템의 핵심기술은 열원에서 열 전달장 소까지의 열 전달기구 효율 및 열 전달 속도에 따라 좌우된다고 할 수 있다. 기존의 난방용 시스템은 물을 열 전달 물질로 하여 고무, 플라스틱 등의 저가형 파이프나 황동, 백동 등의 금속형 파이프를 사용하고 있으나 열 전달 효율 및 속도가 현저히 낮아 열 손실로 인한 에너지 낭비가 심하다. 이 재료들은 지속적인 온수 순환을 통해 파이프 내부에 스케일 및 녹이 많이 생기게 되고 이 때문에 파이프 자체의 부식 또는 경화를 가져오는 단점을 지니고 있다.

본 논문에서는 이러한 단점을 지닌 기존 난방용 시스템의 대체시스템으로 액체가 기체로 바뀌는 증발과 반대로 기체가 액체로 응축될 때 흡수 및 방출되는 잠열을 이용하여, 대량의 열을 이동시키는 열 전달기구인 히트파이프와 고안된 전기히터 바의 특성을 소개하고 대류 및 바닥 면의 온도센서를 이용하여 히트파이프 난방시스템이 설치된 곳의 이중 온도 제어와 전기히터 바의 상태를 효과적으로 제어할 수 있는 컨트롤러를 개발하여 에너지 효율을 증대하고자 한다.

2. 히트파이프의 특성

2.1 작동 원리

히트파이프는 진공으로 밀폐된 용기 내에 적합한 양의 작동유체를 주입시켜 한쪽에서 고온의 열매체

를 가열하면 작동유체가 증발하여 다른 쪽으로 압력의 차에 의해 증기가 이동하고, 이 때 외부로부터 저온의 매체로 증기를 응축시킴으로서 가열량 만큼 작동유체의 증발 잠열에 의해 열을 저온의 매체로 전달하는 장치이다. 응축된 액체는 모세관 혹은 중력 등에 의해 증발부로 귀환한다. 히트파이프에서는 열전달이 작동유체의 증발 잠열에 의해 열이 전달되기 때문에 열저항이 금속재료에 비하여 현격히 적다. 따라서 작은 온도차로 많은 열량을 전달시킬 수 있고, 또한 소요 동력없이 고온측에서 저온측으로 열을 이동시킬 수 있다. 이런 장점들로 인하여 필요한 열제 시스템의 경량화와 고성능화를 꾀할 수 있다.

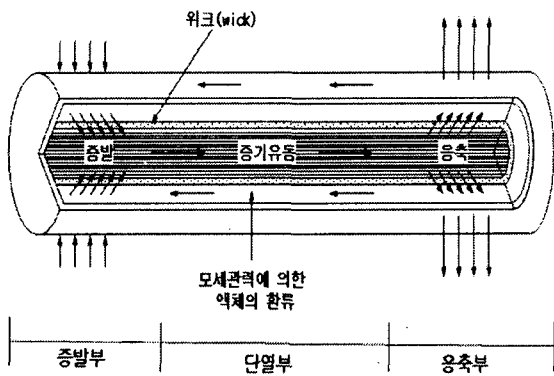


그림 1 히트파이프의 구조
Fig. 1 Structure of heat pipe

히트파이프의 구조는 그림 1에 나타낸 바와 같이 밀폐용기, 위크 구조, 위크 부분을 채우는 동작액, 증기공간으로 구성되어 있으며, 증발부(가열부), 단열부 및 응축부(냉각부)로 이루어져 있다.

히트파이프의 열전달 과정은 증발부 내의 작동유체가 외부의 열에 의해 증발하고 증기상태의 작동유체는 밀도 차에 의해 응축부로 이동하여 증발부보다 더 낮은 외부의 열매체에 열을 전달하고 작동유체는 열부에서 응축하는 상변화에 의해 귀환함으로써 작동유체의 잠열에 의해 열을 계속 전달하게 되는 것이다.

히트파이프는 열전도성이 좋은 금속에 비교해서, 중량당 수백배인 다량의 열수송을 할 수 있고, 가열부에서 떨어진 냉각부에 적은 온도차로 열을 수송할 수 있다. 또한, 유체를 순환시키는 펌프가 필요 없고, 소음이 적고, 연료비가 절감되며, 무중력장에서도 작동할 수 있다는 특징 때문에 난방 시스템, 인공위성용의 열제어, 전자장치의 냉각이나 공조 및 엔진의 냉각 등에서부터 각종 열교환기에 이르기까지 광범위한 분야에서 실용화되고 있다.^{[1],[2]}

2.2 작동온도

히트파이프는 온도 구배를 이용하지 않고 작동유체의 상변화를 이용하여 열을 전달하므로 내부 열저항이 매우 적기 때문에 start-up 경우를 제외하는 등온상태에서 작동한다고 가정할 수 있다. 따라서 히트파이프의 온도는 길이 및 반경 방향의 변화는 무시할 수 있으며 단지 시간에 대한 변화만 고려할 수 있다. 히트파이프의 작동이 시작되어 정상상태에 도달하는 과정동안의 작동온도를 예측할 수 있다. 열역학 제1법칙을 이용하여 외부로 방출된 열량의 차이는 히트파이프의 내부에너지의 변화와 같으므로 히트파이프의 온도 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(t + \Delta t) = T(t) + \frac{(Q_{in} - Q_{out})}{C_e L_t} \Delta t \quad (1)$$

여기서, L_t 는 히트파이프 전체 길이, Q_{in} 은 증발부에 가해지는 열량으로 대부분의 경우 열유속으로 주어진다. Q_{out} 은 응축부에서 외부로 방출되는 열량으로 대류열전달, 열유속 및 복사열전달 등으로 다음과 같다.

$$Q_{out} = \begin{cases} hA_s [T(t) - T_\infty] \\ q''(t)A_s \\ \epsilon \rho A_s [T^4(t) - T_\infty^4] \end{cases} \quad (2)$$

여기서, h 는 열전달 계수, A_s 는 응축부의 표면적, T_∞ 는 주위의 온도이다. q'' 는 열유속이며, ϵ 은 복사 방사율이고, σ 는 Stefan-Baltzmann 상수이다. 한편 식 (1)에서 C_e 는 히트파이프의 단위 길이가 가지는 유효비열로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_e = (\rho c)_p A_p + (1 - \epsilon) \frac{(\rho c)_w A_w}{\epsilon} + (\rho c)_v A_v \quad (3)$$

여기서 ρ 는 밀도, c 는 비열, A 는 단면적으로 대부분의 경우 일정하다. 또 ϵ 는 모세관구조의 공극률(porosity)이다. 아래첨자 p, w, f, v 는 각각 히트파이프의 용기, 모세관구조, 작동유체의 액체 및 기체를 가리킨다.

한편 응축부에서 대류열전달에 의하여 열방출이 발생하는 경우에는 식 (1)의 Q_{out} 대신에 대류열전달 표현인 $hA_s(T(t) - T_\infty)$ 을 대입하면 식은 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{hA_s}{C_e L_t} \left(T - T_\infty - \frac{Q_{in}}{hA_s} \right) \quad (4)$$

위 식의 우변에서 온도 T 를 제외한 모든 변수가 일정하고 히트파이프의 초기온도가 T_∞ 와 같은 경우에는 아래와 같이 시간에 대한 온도의 변화로 나타낼 수 있다.

$$T(t) = -\frac{Q_{in}}{hA_s} \exp\left(-\frac{hA_s}{C_e L_t} t\right) + T_\infty + \frac{Q_{in}}{hA_s} \quad (5)$$

따라서 히트파이프에 대한 열입력량과 열전달계수를 알면 위 식 (5)를 이용하여 히트파이프가 초기상태에서 정상상태에 도달하는 과정동안의 작동 온도를 구할 수 있다. 일반적으로 열입력량은 일정한 값으로 주어지나 열전달계수는 실험을 통하여 구하여진다.

응축부에서 열 방출이 복사에 의하여 이루어지는 경우에도 식 (2)에 주어진 Q_{out} 을 다음과 같이 변형하면 식 (5)을 이용하여 근사값을 얻을 수 있다.

$$Q_{out} = \epsilon \sigma A_s [T^4 - T_\infty^4] = h_r A_s [T - T_\infty] \quad (6)$$

여기서 $h_r = \epsilon \rho [T^2 + T_\infty^2][T + T_\infty]$ 로 표시된다.

2.3 열 전달계수

실제로 히트파이프가 응용되는 많은 경우에 응축부에 적용되는 열전달 형태는 대류열전달이다. 따라서 식 (5)를 사용하기 위하여 열전달계수의 정확한 값이 필수적이다. 이미 그 값이 알려진 경우에는 바로 사용할 수 있으나 그렇지 않은 경우에서 실험적으로 구할 수 있다. 즉, 히트파이프와 같은 크기의 작동유체가 들어있지 않은 용기를 똑 같은 조건에서 실험하여 온도 분포를 측정한다. 이 때 용기 내부에는 작동유체가 없기 때문에 내부에서 열전달은 거의 무시할 수 있다. 따라서 히트파이프로 작동하지 않고 핀과 같은 역할을 하므로 측정된 온도와 핀의 온도분포를 나타내는 다음의 식들에서 얻은 온도분포와 비교하여 열전달 계수를 얻을 수 있다.

용기의 길이가 길거나 또는 열전도계수가 적어서 용기 끝의 온도가 주위의 온도와 같은 경우에는 다음 식을 이용할 수 있다.

$$T = T_\infty + (T_b - T_\infty)e^{-mx} \quad (7)$$

여기서, T_b 는 핀의 바탕의 온도로 응축부가 시작되는 곳의 온도이며, m 은 $\sqrt{hP/kA_c}$ 이다. P 는

용기의 외부 둘레, k 는 용기의 열전도계수, A_c 는 용기의 단면적이다.

핀 끝의 온도가 주위의 온도보다 높은 경우에는 핀 끝 단면에서 열전달을 무시하면 온도분포는 다음 식으로 구하여 측정값과 비교할 수 있다.

$$T = T_\infty + (T_b - T_\infty) \frac{\cosh m(L_c - x)}{\cosh mL_c} \quad (8)$$

여기서, L_c 는 용기의 응축부 길이이다. 측정치와 위 식 (7) 또는 (8)를 이용하여 얻은 온도분포가 일치하도록 열전달 계수(h)를 변화시키면서 열전달계수 값을 구한다.^{[3]-[5]}

3. 실험장치

그림 2는 전기히터 바를 적용한 난방시스템의 개략도를 나타내고 있다. 이 시스템은 상용전원을 공급받아 전기히터 바를 가열하여 히트파이프내의 발열물질을 가열시켜 히트파이프로 열을 전달하여 온도를 일정하게 유지시키도록 컨트롤러에서 제어가 가능하게 하였다.

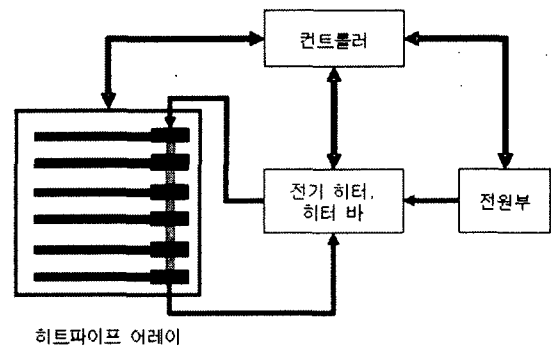


그림 2 전기히터 바를 적용한 난방 시스템 개략도
Fig. 2 Schematic diagram of a heating system by using electric heater bar

그림 3은 본 실험에 사용한 실험장치이다. 동관 히트파이프를 이용하여 400W용 히터에 상용 전원을 공급하고 개발한 컨트롤러로 대류 및 바닥면의 온도범위는 20℃부터 60℃까지 제어가 가능하도록 하였고, 전기히터 바의 최고 온도는 120℃에서 전원이 자동 차단되도록 제작하였다. 또한, 전기히터 바는 히터에서 발생된 열을 항온조에서 일정하게 유지하도록 하였다. 히트파이프의 길이를 150cm로 제작하여 히터 바의 온도를 70℃, 80℃, 90℃으로 주어졌을 때 히트파이프 길이에 따른 온도를 측정하였다.

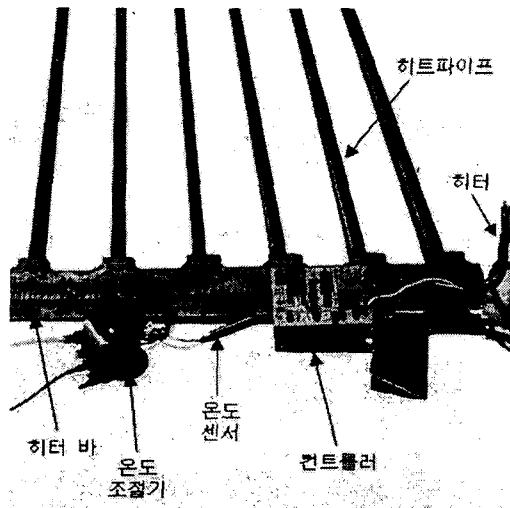


그림 4 실험장치
Fig. 3 Experiment apparatus

그림 4는 히트파이프용 온도제어 회로도이다. 본 회로도는 PIC16C73B-04/SP를 사용하여 온도범위를 최저 20°C부터 최고 60°C까지 설정하였으며, 외출시는 30°C에 고정되도록 프로그램 되었다. 디스플레이부는 현재 온도와 설정 온도를 볼 수 있도록 나타냈다.

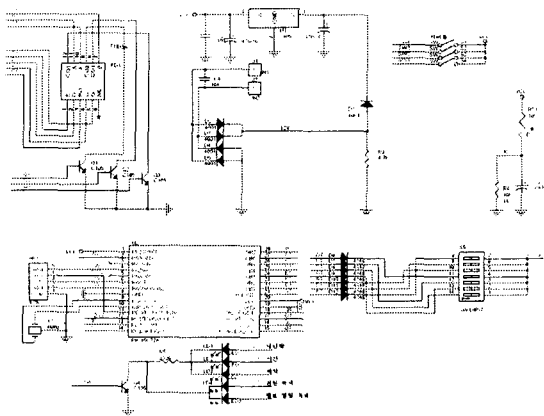


그림 5 온도 제어 회로도
Fig.4 Schematic of temperature control

4. 실험결과 및 고찰

그림 5는 히트 바의 온도가 70°C를 유지하였을 때의 히트파이프 길이에 따른 온도 응답을 측정하였다. 실험 결과 110초 부근에서 급격히 온도가 상승하여 60°C까지 온도가 증가하여 그 이후로 온도가 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

그림 6은 히트 바의 온도가 80°C, 그림 7은 90°C를 유지하였을 때의 히트파이프 길이에 따른 온도

응답을 측정하였다. 실험 결과는 대체적으로 그림 5의 결과와 유사였으며, 최종 도달 온도가 약 10°C씩 증가함을 살펴볼 수 있었으며 길이에 따른 온도가 거의 변하지 않음을 알 수 있었다.

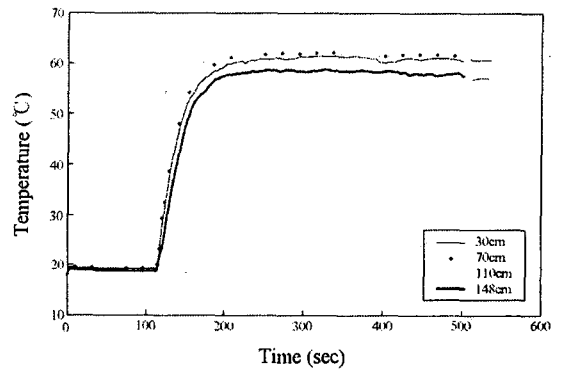


그림 5 70°C일 때 히트파이프의 온도 특성
Fig. 5 Temperature Characteristic of heat pipe at 70°C

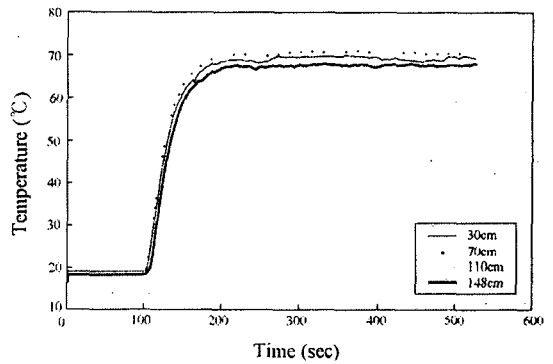


그림 6 80°C일 때 히트파이프의 온도 특성
Fig. 6 Temperature Characteristic of heat pipe at 80°C

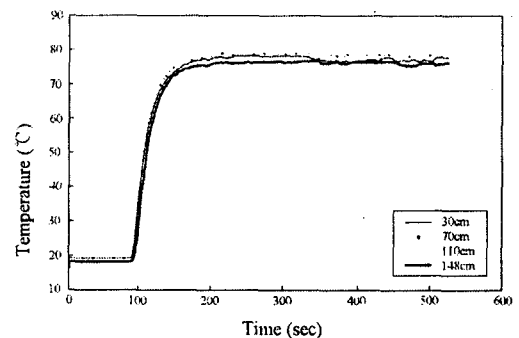


그림 7 90°C일 때 히트파이프의 온도 특성
Fig. 7 Temperature Characteristic of heat pipe at 90°C

5. 결론

이상에서와 같이 히트파이프를 이용하여 난방시

시스템에 적용할 수 있도록 히터 바의 온도 및 히트파이프의 길이에 따른 온도특성을 분석하였다.

히트파이프의 길이에 따른 온도 변화는 거의 변화가 없었음을 살펴 볼 수 있었으며, 히터 바의 온도에 따른 파이프의 최고 온도는 약 10°C 정도 차이는 있었지만, 기존의 다른 난방시스템보다는 에너지 효율 면에서 훨씬 효과적이라고 생각된다.

본 논문에서는 아직까지 난방 시스템의 완성단계에는 도달하지 못하여 단열을 하지 않고 실험하였지만 차후에는 단열을 시킨 후 온도 변화 특성을 파악하고자 한다. 앞으로 400W용 히터를 사용하여 시간별 소비전력과 일별 소비전력을 측정 분석하여 히트파이프용 온도 컨트롤러를 상용화될 수 있도록 할 계획이다.

본 논문은 2003년 기술혁신개발사업(2003.4~2004.3)에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] Feldman, K. T. Jr., "Investigation of Heat Transfer Limits in Two-Phase Closed Thermosyphons", 5th IHPC, 1994.
- [2] 장중훈, "히트파이프의 비정상상태 작동온도 예측에 대한 연구", 울산대학교 공학 연구논문집, Vol. 28, No. 1, pp. 33~46, 1997.
- [3] 정원복, 부준홍, "위성체용 알루미늄 히트파이프의 성능에 관한 실험연구", 한국항공대학교논문집, Vol. 35, pp. 5-6, 1997.3.
- [4] Jang, J. H, Faghri, A., and Chang, W. S., "Analysis of One-Dimensional Transient Compressible Vapor Flow in Heat Pipes", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 34, No. 8, pp. 2029-2037, 1991.
- [5] Brovalsky, P.I. and Melkinov, V., "The Method of Calculation and Investigation of High Temperature Heat Pipe Characteristics Taking into Account the Vapor Flow Compressibility, Friction and Velocity Profile", Proc. 2nd Int. Heat Pipe Conf., pp. 113-122, 1976.